

**Eigenschaften
geschweißter Mischverbindungen
zwischen Stählen
und Chrom-Nickel-Stählen**

**von
Ing. C. Pohle**

Vorwort

1	Einführung	1
1.1	Einsatzgebiete und Bezeichnungen von Mischverbindungen	1
1.2	Werkstoffliche Besonderheiten	1
1.3	Historischer Überblick	2
2	Mischkristalle und Phasen	5
2.1	Einleitung	5
2.2	Kristallgitter von Mischkristallen	5
2.3	Intermetallische Phasen	7
2.4	Sigma-, Chi- und Etaphase	8
2.4.1	Entstehungsmechanismus	8
2.4.2	Sigmaphase	8
2.4.3	Chi- und Etaphase	10
2.4.4	Ferritzerfall	11
2.4.5	Eigenschaften der Phasen	12
3	Werkstoffe	14
3.1	Grundwerkstoffe	14
3.2	Schweißzusatz	14
3.3	Auswahl des Schweißzusatzes	14
4	Herstellen von Schwarz-Weiß-Verbindungen	18
4.1	Schweißnahtgestaltung	18
4.1.1	Verbindungsnahte	18
4.1.2	Ausführungsbeispiele	18
4.1.2.1	Apparatebau	18
4.1.2.2	Dampfkesselbau	21
4.1.3	Schwarz-Weiß-Übergangsstücke	22

**Eigenschaften
geschweißter Mischverbindungen
zwischen Stählen
und Chrom-Nickel-Stählen**

**von
Ing. C. Pohle**

4.2	Schweißen von Mischverbindungen	24
4.2.1	Schweißprozeß	24
4.2.2	Das Schaeffler-Diagramm	26
4.2.2.1	Aussagefähigkeit	26
4.2.2.2	Martensit-Starttemperatur	29
4.2.2.3	Diskussion	30
4.2.3	Schweißtechnologie	30
4.3	Spannungsarmglühen	31
4.3.1	Allgemeine Hinweise	31
4.3.2	Einfluß des Glühens auf die Eigenspannungen	32
4.4	Qualitätssicherung	33
4.4.1	Betriebssicherheit der Schweißung	33
4.4.2	Zerstörungsfreie Prüfmethode	33
5	Metallographische Untersuchungsmethoden	36
5.1	Lichtoptische Metallographie	36
5.2	Mikrohärteprüfung	40
5.3	Rasterelektronenmikroskopie	41
5.4	Ambulante Metallographie	43
6	Fertigungsbedingte Rißbildung	44
6.1	Heißrisse	44
6.2	Dilatations-Heißrisse	45
6.3	Kaltrisse (wasserstoffinduzierte Risse)	48
7	Mechanisch-technologisches Verhalten	53
7.1	Allgemeines Bruchbild	53
7.1.1	Trennbruch (Sprödbbruch)	53
7.1.2	Zähbruch (Verformungsbruch)	53
7.1.3	Schwingbruch	53
7.2	Verfahrensprüfung der Firma Krupp (1935)	53
7.3	Zugversuch	55
7.3.1	Einleitung	55
7.3.2	Versuchsergebnisse	55
7.3.2.1	Schwarz-Weiß-Stumpfnah	55
7.3.2.2	Plattierungsstumpfnah	56
7.4	Biegeversuch	56
7.4.1	Einleitung	56
7.4.2	Querbiegeversuch	57
7.4.3	Längsbiegeversuch	57
7.4.4	Seitenbiegeversuch	57
7.4.5	Plattierungsproben	58
7.4.6	Anwendungsbezogener Biegeversuch	58

7.5	Kerbschlagbiegeversuch	59
7.5.1	Einleitung	59
7.5.2	V Versuchsergebnisse	59
7.5.2.1	Blech X6 CrNiTi 18 10 und Schweißgut 18-8-Mn	59
7.5.2.2	Schweißgut 18-8-Mn und 25-14	59
7.5.2.3	Schweißgut 18-8-Mn und 29-9	60
7.5.2.4	Ergebnisse nach <i>Zürn</i> und <i>Morach</i>	61
7.5.2.5	Ergebnisse nach <i>Decker</i> u. a.	63
7.5.2.6	Ergebnisse nach <i>Engelhard</i> u. a.	64
7.5.3	Diskussion des Probenverhaltens	65
7.6	Schwingversuch	66
7.6.1	Einleitung	66
7.6.2	V Versuchsergebnisse	66
7.6.2.1	Zug-Druck-Wechselversuch	66
7.6.2.2	Umlaufbiegeversuch nach <i>Pohle</i> u. a.	69
7.6.2.3	Zugschwellversuch mit gekerbten Proben	72
7.6.2.4	Zug-Druck-Wechselversuch nach IRSID und UNIREC	73
7.6.2.5	Biegewechselsversuch nach <i>Gülec</i>	78
7.6.2.6	Biegewechselsversuch nach <i>Fujiwara</i>	80
7.6.3	Diskussion des Rißverhaltens	83
7.7	Innendruck-Schwellversuch	83
7.7.1	Kesseltrommel-Modell der Firma Krupp (1935)	83
7.7.2	Modell mit gekerbten Längsnähten	85
7.8	Berstversuch	86
7.8.1	Kesseltrommel-Modell der Firma Krupp (1935)	86
7.8.2	Modell mit gekerbten Längsnähten	87
7.9	Härteprüfung	88
7.10	Diskussion „Wanddicke von innendruckbeanspruchten Bauteilen“	93
8	Mechanisch-thermisches Verhalten	96
8.1	Einleitung	96
8.2	Zeitstandversuch	96
8.2.1	Zeitstandversuch nach <i>Nath</i>	96
8.2.2	Zeitstandversuch nach <i>Ruttmann</i>	97
8.3	Temperaturwechselversuch	97
8.3.1	Abschreckversuch nach <i>Löfblad</i> und <i>Lindh</i>	97
8.3.2	Zugbeanspruchung nach <i>Jahn</i>	98
8.3.3	Zugschwellbeanspruchung nach <i>Gülec</i>	99
8.3.4	Biegebeanspruchung nach <i>Klueh</i> u. a.	101
8.4	Innendruck-Temperaturwechselversuch	102
8.4.1	Druckgefäß aus Kesselrohr nach <i>Jahn</i>	102
8.4.2	Druckgefäß aus Kesselrohr nach <i>Moles</i> u. a.	103
8.4.3	Druckgefäß aus Rohr nach <i>Emerson</i> u. a.	105
8.4.4	Halbschalen-Druckgefäß nach <i>Pohle</i>	106
8.5	Austausch von Temperatur und Zeit beim Glühen	112
8.6	Diskussion „Thermische Beanspruchung“	114

9	Wärmespannungen	116
9.1	Dilatationsspannungen	116
9.2	Wärmespannungen in Erzeugnisdicke durch Temperaturgradienten	119
9.3	Wärmespannungen im Prüfkörper aus Abschnitt 8.4.4	119
9.4	Diskussion	121
10	Korrosionsbeständigkeit	122
10.1	Einführung	122
10.2	Korrosion durch heiße Gase	122
10.3	Korrosion durch wäßrige Medien	122
10.3.1	Einleitung	122
10.3.2	Korrosionsmechanismus	123
10.3.3	Korrosionsarten der Naßkorrosion	123
10.3.3.1	Galvanische Korrosion	124
10.3.3.2	Spaltkorrosion	125
10.3.3.3	Schwingungsrißkorrosion	125
10.3.3.4	Spannungsrißkorrosion	125
10.3.3.4.1	Übersicht	125
10.3.3.4.2	Laugeninduzierte Spannungsrißkorrosion	126
10.3.3.4.3	Chloridinduzierte Spannungsrißkorrosion	126
10.3.3.5	Wasserstoffinduzierte Spannungsrißkorrosion	126
10.3.3.5.1	Einführung	126
10.3.3.5.2	Schwarz-Weiß-Verbindung im NACE-Test	126
10.3.3.5.3	Prüfergebnisse nach <i>Risch</i>	128
10.4	Einfluß von Druckwasserstoff	128
10.5	Diskussion	128
11	Betriebsbewährung und Schadensfälle	130
11.1	Einleitung	130
11.2	Dampfkesselanlagen	130
11.2.1	Dampfkessel in den USA	130
11.2.2	Dampfkessel in England	132
11.2.3	Dampfkessel in Deutschland	132
11.2.3.1	Heißdampfüberhitzer nach <i>Schneider</i>	133
11.2.3.2	Heißdampfüberhitzer nach <i>Müsch</i>	133
11.2.3.3	Heißdampfüberhitzer nach <i>Kaes</i> u. a.	134
11.2.3.4	Einspritzstation nach <i>Kaes</i> u. a.	136
11.3	Chemieanlagen	136
11.3.1	Herstellungsfehler	136
11.3.1.1	Flansch-Rohr-Verbindung DN 50	136
11.3.1.2	Plattierungstumpfnah	137
11.3.1.3	Flansch-Rohr-Verbindung DN 60	138

11.3.1.4	Stumpfnähte an Kugelhähnen DN 80	139
11.3.1.5	Stutzeinschweißung DN 25/100	140
11.3.1.6	Rührerwelle, Durchmesser 140 mm	141
11.3.1.7	Rohrleitung DN 40	141
11.3.2	Betriebsbedingte Ausfälle	142
11.3.2.1	Kühlkammer	142
11.3.2.2	Kolonnen mit Natronlauge-Sumpf	143
11.3.2.3	Reformerrohre, Durchmesser 118 mm	143
11.3.2.4	Rohrleitungsfestpunkt	144
11.3.2.5	Tragpratzen an Reaktormänteln nach <i>Anhalt</i>	145
11.3.2.6	Rohr-Flansch-Verbindung nach <i>Kahle</i> und <i>Wendel</i>	146
11.3.2.7	Rohrleitung DN 300 nach <i>Kahle</i> und <i>Wendel</i>	146
12	Martensitischer Übergangsbereich	147
12.1	Mechanismus der Martensitbildung	147
12.2	Martensitstruktur im Übergangsbereich	148
12.2.1	Einleitung	148
12.2.2	Martensitstrukturen nach <i>Ornath</i>	148
12.2.3	Martensitstruktur an der Schmelzgrenze nach <i>Wang</i>	149
12.3	Eigenschaften des Martensits nach <i>Pohle</i>	150
12.3.1	Wärmeausdehnungskoeffizient	150
12.3.2	Elastizitätsmodul und mechanisch-technologische Gütewerte	152
12.3.3	Härte	152
12.4	Verhalten bei Rißausbreitung	153
12.4.1	Einleitung	153
12.4.2	Untersuchungen nach IRSID und UNIREC	153
12.4.3	Untersuchungen nach <i>Nath</i>	153
12.4.4	Rißzähigkeitsuntersuchungen nach <i>Pohle</i>	154
12.5	Diskussion „Martensitischer Übergangsbereich“	158
13	Kohlenstoffdiffusion in Mischverbindungen	161
13.1	Einleitung	161
13.2	Kinetik der Volumendiffusion	161
13.3	Löslichkeit von Kohlenstoff in Eisen	162
13.4	Diffusionskoeffizient des Kohlenstoffs	163
13.4.1	Kohlenstoffdiffusion in Eisen	163
13.4.2	Einfluß von Legierungselementen	164
13.5	Karbidssysteme	164
13.6	Thermodynamische Zustandsgrößen	165
13.6.1	Einleitung	165
13.6.2	Enthalpie, Entropie, freie Enthalpie	165
13.6.3	Chemisches Potential, chemische Aktivität	167
13.6.4	Aktivierungsenergie	167

13.7	Vorausberechnung der Breite der entkohlten Zone	168
13.7.1	Gedankenmodell zur Kohlenstoffdiffusion	168
13.7.2	Beispiele nach <i>Christoffel</i> und <i>Curran</i>	169
13.7.3	Methode nach <i>Beckert</i>	171
13.7.4	Methode nach <i>Eckel</i>	172
13.8	Weitere Ergebnisse zur Kohlenstoffdiffusion	174
13.8.1	Kurzzeitglühungen nach <i>Emerson</i> und <i>Hutchinson</i>	174
13.8.2	Einfluß des Mangans auf die Entkohlungsgeschwindigkeit	175
13.8.3	Karbidsaumbildung nach <i>Béres</i>	176
13.8.4	Schwarz-Weiß-Verbindung X 20 CrMoV 12 1 / INCOLOY 800®	176
13.9	Diskussion „Kohlenstoffdiffusion“	177
13.9.1	Ursachen der Kohlenstoffdiffusion	177
13.9.2	Mechanismus der Kohlenstoffdiffusion	177
13.9.3	Diffusion der Legierungselemente	178
13.9.4	Einfluß der martensitischen Übergangszone	179
13.9.5	Ausbildung des Karbidsaumes	179
13.9.6	Einfluß einer Kurzzeitglühung	180
13.9.7	Auswirkungen bei Langzeitglühung	180
13.9.7.1	Temperaturbereich unterhalb 350°C	180
13.9.7.2	Auswirkungen oberhalb 350°C	180
13.9.8	Anwendungsmöglichkeiten der Berechnungsformeln	180
14	Zusammenfassung	182
15	Folgerungen	184
16	Gegenüberstellung von DIN- und EN-Normen	186
	Schrifttum	187
	Sachwortverzeichnis	195